

УДК 621.365.32

doi:10.20998/2413-4295.2017.32.05

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
НА ПРОЦЕС ПРЯМОГО ГРАФІТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДІВ У ПЕЧАХ КАСТНЕРА****А. Я. КАРВАЦЬКИЙ^{1*}, Є. М. ПАНОВ², А. Ю. ПЕДЧЕНКО³, С. В. ЛЕЛЕКА³, Т. В. ЛАЗАРЄВ³,
В. В. ДЕРКАЧ⁴, О. В. ТЮТЮННИК⁴**¹ Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА² Інженерно-хімічний факультет, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА³ НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА⁴ ПрАТ «Укрграфіт», Запоріжжя, УКРАЇНА

*email: admin@rst.kpi.ua

АНОТАЦІЯ Використовуючи розроблену числову модель теплоелектричного стану печі графітування Кастнера, виконано числові дослідження впливу внутрішнього діаметра кільцевих електропрокладок і контактної електричної опору між електродними заготовками на фізичний стан печі прямого нагріву. Запропоновано для збільшення мінімальної температури заготовок впровадити процес графітування вуглецевої продукції використовувати на кінцях електродних свічок електроконтактні прокладки з підвищеним електричним опором. Раціональним діаметром отвору електроконтактних міжелектродних прокладок є отвір, розміри якого становлять біля 50–70 % від зовнішнього діаметра заготовок.

Ключові слова: графітові електроди; піч графітування Кастнера; електроконтактна прокладка; контактний електричний опір.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL
PARAMETERS ON THE DIRECT GRAPHITIZATION PROCESS OF ELECTRODES IN
CASTNER FURNACES****A. KARVATSKIY^{1*}, YE. PANOV², A. PEDCHENKO³, S. LELEKA³, T. LAZARIEV³,
V. DERKACH⁴, O. TYUTYUNNYK⁴**¹ Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, UKRAINE² Faculty of Chemical Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, UKRAINE³ Research Center "Resource-Saving Technologies", Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, UKRAINE⁴ PrJSC "Ukrgrafit", Zaporizhia, UKRAINE

ABSTRACT The numerical research was held to determine possible directions for improvement and modernization of the modern domestic technology of direct graphitization. The influence of the changes in circular gasket internal diameter and contact electrical resistance between electrode artifacts on the state in Castner furnace was investigated. It was found out that the diameter decrease leads to overheating in the central axial part of the electrodes. In turn, the diameter increase leads to significant temperature drops. It was also determined that the usage of gaskets with the increased value of electrical resistance during the graphitization process increases the temperature drop in the central artifacts. Based on the obtained results, the following measures to enhance the energetic efficiency of Castner furnaces operation were proposed: the usage of gaskets with the internal diameter, which is 50-70% from the external artifact diameter; the usage of gaskets with the increased value of electrical resistance on the ends of electrode candles. As a material for end electrocontact gaskets, it is possible to use graphite intercalation material with an increased value of electrical resistance, a multilayer structure, which consists of two paired layers of thermo-extended graphite of high and low density, graphite powder, etc. These measures enable to decrease the time for carbon production graphitization, diminish energy expenses and enhance the quality of the electrode products.

Keywords: graphite electrodes; Castner graphitization furnace; electrocontact gasket; contact electrical resistance.

Вступ

Більш ніж 40 % усієї сталі у світі виплавляється в електродугових сталеплавильних печах, і цей показник з кожним роком зростає [1,2]. Основним конструктивним елементом електродугових печей є пакет електродів, виготовлених із штучного графітового матеріалу [3,4]. У промислових масштабах для графітування вуглецевих електродних заготовок раніше найбільшого поширення набув метод Ачесона. Проте інший метод – метод Кастнера,

який дає можливість отримувати графітові електроди з меншими питомими витратами електроенергії на одиницю виробленої продукції та за менший період часу, за останні роки також набуває популярності на вітчизняному ринку вуглеграфітової продукції [5,6].

Основною відмінністю печей графітування, що працюють за методом Кастнера від печей, що працюють за методом Ачесона, є прямий нагрів вуглецевих заготовок, який полягає у пропусканні постійного електричного струму крізь електродні заготовки та виділення в них джоулевої теплоти. У

печах прямого нагріву електродні заготовки розміщують горизонтально стик-у-стик в один або кілька колон (свічок) і покривають шаром теплоізоляційного матеріалу. Для покращення контакту між заготовками в місцях їх контакту розміщують кільцеві електропрокладки, виготовлені з гнучкого матеріалу, який може витримувати значні температурні навантаження [7].

Задля можливості конкурувати на міжнародному ринку вуглеграфітової продукції вітчизняному виробнику потрібно проводити заходи щодо модернізації та удосконалення печей графітування, що працюють за методом Кастнера. Тому проведення досліджень, спрямованих на визначення можливостей удосконалення, модернізації конструкцій печей прямого нагріву та технологічного процесу прямого графітування є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Доступна у відкритому доступі наукова література переважно присвячена печам Ачесона та непрямому методу графітування вуглеграфітової продукції. Проте наявна інформація щодо досліджень печей як прямого, так і непрямого нагріву електродних заготовок, дає розуміння напрямку вдосконалення печей графітування Кастнера:

- об'єднане виробництво інших матеріалів, наприклад, карбиду кремнію (SiC) [8];

- використання в теплоізоляційному шарі трубчастих теплообмінників з метою рекуперації теплової енергії та зменшення часу охолодження печі графітування [9];

- визначення параметрів системи підведення електричної енергії до печі опору в режимі реального часу для забезпечення оптимального режиму роботи [10];

- визначення допустимих значень сили стиснення електродних заготовок з метою забезпечення їх механічної цілісності впродовж процесу графітування [11–13];

- зменшення викидів газів, що виділяються у процесі графітування електродної продукції, у навколишнє середовище [14–16];

- зменшення витрат теплоти та витрат електроенергії за допомогою використання спеціально підбраного складу теплоізоляційного матеріалу та бокових плит, виготовлених із вуглецевого тепло- й електроізоляційного матеріалу [17].

Мета та завдання

Визначити та запропонувати прості та ефективні методи з модернізації сучасної технології прямого графітування для її впровадження на вітчизняних підприємствах.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні завдання:

- виконати числові дослідження теплового стану печі Кастнера за різних конструктивно-технологічних параметрів;

- провести зіставлення отриманих результатів з температурних полів впродовж кампанії графітування за різних варіантів формування електродних свічок;

- визначити можливі напрямки удосконалення конструкції печей прямого нагріву.

Виклад основного матеріалу

Числові дослідження проводилися з використанням верифікованої числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера, описаної в роботі [7].

Нижче наведено результати числових експериментів із визначення впливу розмірів електроконтактних прокладок і контактної електричної опору (КЕО) між електродними заготовками у свічках на тепловий стан печі Кастнера.

Числові дослідження із визначення впливу розміру діаметра внутрішнього отвору електроконтактної прокладки на розподіл температурних полів у заготовках проводилися для схеми завантаження печі графітування у дві свічки. Розмір діаметрів електродних заготовок і зовнішніх діаметрів прокладок становив 435 мм. Розмір внутрішніх діаметрів прокладок мав значення 120 мм, 220 мм і 320 мм. Критерієм закінчення процесу графітування слугувало досягнення значення питомих витрат електроенергії 3700 кВт·год/т. У результаті процес підведення електричної енергії до печі складав біля 12 год.

У результаті аналізу отриманих числових даних з'ясовано, що завдяки збільшенню розміру діаметра внутрішнього отвору електроконтактної прокладки від 120 мм до 320 мм підвищується мінімальна температура в крайніх торцевих заготовках впродовж кампанії графітування майже на 100 °С (рис. 1), а в інших заготовках – не призводить до суттєвої зміни мінімальної температури.

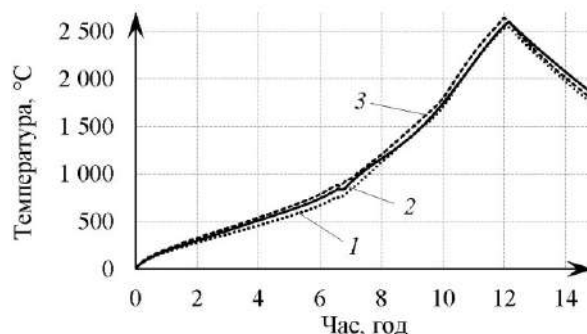


Рис. 1 – Зміна мінімальної температури крайніх заготовок в електродних свічках під час їх нагрівання у разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з різним значенням розміру внутрішнього діаметра: 1 – Ø120 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø320 мм.

Виявлено, що зміна значення внутрішнього діаметра прокладок майже не впливає на значення перепаду температури у крайніх заготовках, проте його збільшення від 120 мм до 320 мм призводить до підвищення перепаду в центральних заготовках майже на 200 °С впродовж кампанії графітування (рис. 2), що може негативно вплинути на якість готової електродної продукції.

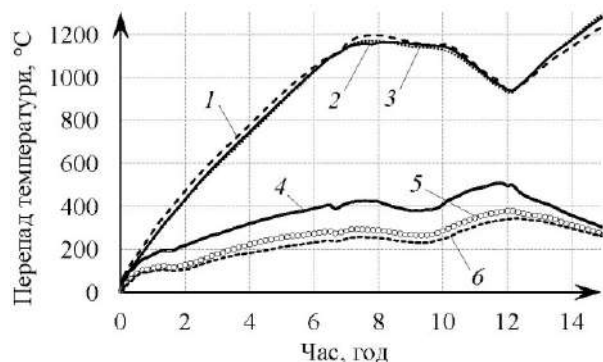


Рис. 2 – Різниця між максимальними та мінімальними значеннями температури в заготовках у разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 (Ø320 мм), 2 (Ø220 мм), 3 (Ø120 мм) – перепад температури у крайніх заготовках; 4 (Ø320 мм), 5 (Ø220 мм), 6 (Ø120 мм) – перепад температури в центральних заготовках.

Встановлено, що радіальні значення розподілу температурних полів у середній частині заготовок майже не змінювалися у разі зміни внутрішнього діаметра електроконтактних прокладок.

Радіальні перепади температури в торцевих частинах заготовок визначалися в поперечному перерізі на відстані 50 мм від торця заготовок. Перепад температури визначався як різниця значень температури між центром і середнім значеннями температури у точках, розташованих на відстані 50 мм від периферії (рис. 3).

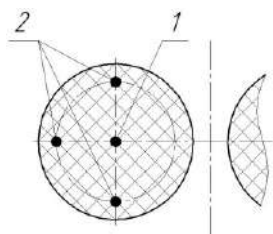


Рис. 3 – Точки для визначення величини радіального перепаду температури в торцевій частині заготовок: 1 – центральна дослідна точка; 2 – периферійні дослідні точки.

У результаті порівняння графіків зміни радіального перепаду температури в торцевій частині електродних заготовок упродовж кампанії

графітування виявлено, що зменшення внутрішнього діаметра електроконтактних прокладок дає можливість значно зменшити перепад температур у центральних заготовках за високих температур процесу графітування (рис. 4).

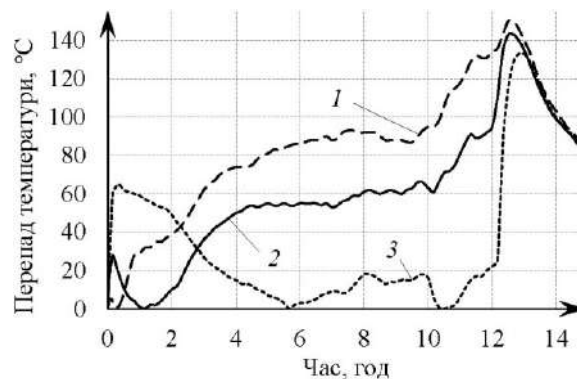


Рис. 4 – Зміна перепаду температури в торцевій частині центральних заготовок під час їх нагрівання в разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 – Ø320 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø120 мм.

Зміна радіального перепаду температур у торцевій частині крайніх заготовок характеризується зміщенням максимальних його значень у сторону більш високих температур у разі зменшення внутрішнього діаметра міжелектродних прокладок до 120 мм (рис. 5), що може негативно вплинути на якість готової електродної продукції.

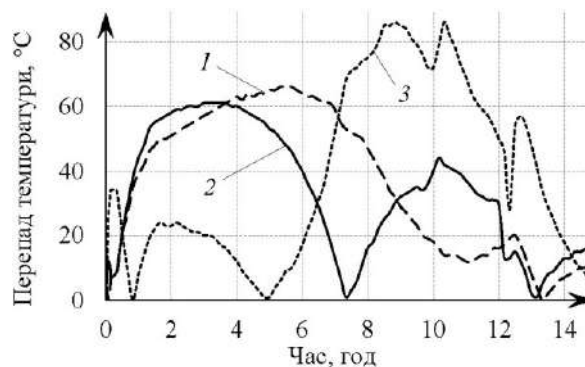


Рис. 5 – Зміна перепаду температури в торцевій частині крайніх заготовок під час їх нагрівання в разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 – Ø320 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø120 мм.

Числові дослідження з визначення впливу значення КЕО між заготовками на розподіл температурних полів в електродних свічках проводилися із використанням схеми завантаження печі графітування у дві свічки. Розмір діаметрів електродних заготовок і зовнішніх діаметрів прокладок становив 435 мм. Розмір внутрішнього

діаметра електроконтактної прокладки складав 220 мм.

Під час числового аналізу теплоелектричного стану печі Кастнера температурна залежність значення КЕО [18] збільшувалася на коефіцієнт k , що прямопропорційно збільшувало значення КЕО в усьому температурному діапазоні.

Аналіз отриманих результатів числових експериментів показав, що збільшення значення коефіцієнта k (відповідно і збільшення значення КЕО між заготовками) дає змогу дещо підвищити мінімальну температуру у крайніх торцевих заготовках (рис. 6).

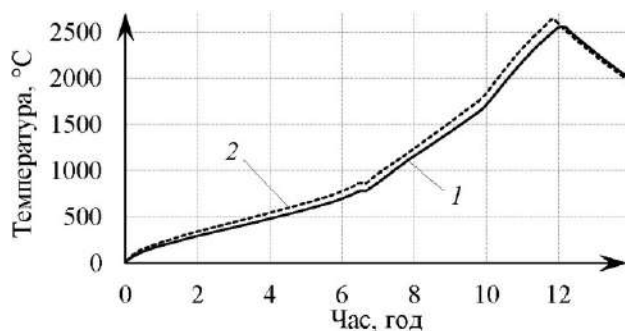


Рис. 6 – Зміна мінімальної температури крайніх заготовок під час їх нагрівання в разі зміни значенням КЕО між електродними заготовками: 1 – $k = 1$; 2 – $k = 10$.

Збільшення значення КЕО також спричинює зниження перепаду температури у крайніх заготовках за високих температур обробки. Але збільшення КЕО в 10 раз призводить до підвищення перепаду в центральних заготовках електродної свічки більше ніж на 100 °С впродовж кампанії графітування (рис. 7), що може призвести до зниження якості готової електродної продукції.

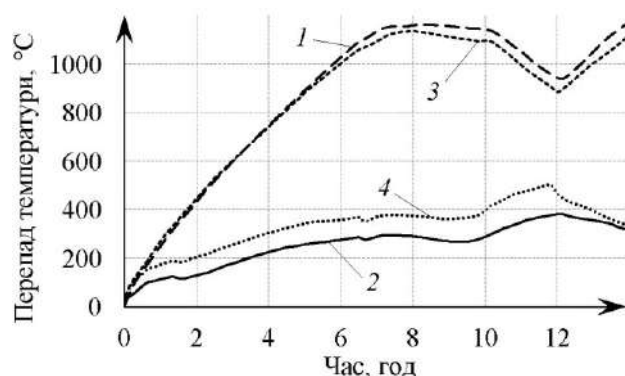


Рис. 7 – Перепад температури в заготовках у разі зміни значенням КЕО між електродними заготовками: 1 ($k = 1$), 3 ($k = 10$) – перепад температури у крайніх заготовках; 2 ($k = 1$), 4 ($k = 10$) – перепад температури в центральних заготовках.

Обговорення результатів

У результаті проведення числових досліджень встановлено, що оптимальним діаметром отвору електроконтактних кільцевих прокладок є отвір, розміри якого становлять близько 50–70 % від зовнішнього діаметра заготовок. Менше значення діаметра отвору призводить до перегріву центральної частини електродів, а більше – до значних радіальних перепадів температури.

Електроконтактні прокладки з підвищеним значенням електричного опору доцільно використовувати лише на кінцях електродних свічок, де вони дають змогу підвищити мінімальну температуру крайніх заготовок впродовж кампанії графітування. А це, відповідно, зменшує тривалість підведення електричної енергії до печі та питомі витрати електроенергії. У якості матеріалу для торцевих електроконтактних прокладок можливе використання графітового інтеркаляційного матеріалу [19,20] з підвищеним значенням електричного опору, багатшарової структури, яка складається попарно з шарів терморозширеного графіту високої та низької густини [21], графітового порошку тощо.

Висновки

Проведено числові дослідження теплового стану печі графітування Кастнера за різних розмірів внутрішнього діаметра електроконтактних кільцевих прокладок і значеннях КЕО між електродними заготовками.

Виконано порівняння отриманих результатів температурних полів упродовж кампанії графітування. У результаті встановлено, що значне зменшення діаметра кільцевих електроконтактних прокладок призводить до перегріву центральної осової частини електродних свічок, а збільшення – до високих значень радіальних перепадів температури. Використання кільцевих прокладок з підвищеним електричним опором доцільне лише на кінцях електродних свічок.

Список літератури

1. **Makarov, A. N.** Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces / **A. N. Makarov, V. V. Rybakova, M. K. Galicheva** // *Journal of Electromagnetic Analysis and Application*. – 2014. – Vol. 6. – P. 184-192. – doi:10.4236/jemaa.2014.67018.
2. **Adams, R.** Graphite electrode and needle coke development / **R. Adams, W. Frohs, H. Jäger** [et al.]. — *Carbon 2007 Conference*, 15-20 July 2007, Seattle, Washington, USA.
3. **Lee, S.-M.** Bulk graphite: materials and manufacturing process / **S.-M. Lee, D.-S. Kang, J.-S. Roh** // *Carbon Letters*. – 2015. – Vol. 16, No. 3. – P. 135-146. – doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
4. **Inagaki, M.** Thermal Management Material: Graphite / **M. Inagaki, Y. Kaburagi, Y. Hishiyama** // *Advanced*

- Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 16, No. 5. – P. 494-506. – doi:10.1002/adem.201300418.
5. **Kuznetsov, D. M.** A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods / **D. M. Kuznetsov, V. K. Korobov** // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2001. – Vol. 42, Nos. 9-10. – P. 355-359. – doi:10.1023/A:101402273.
 6. **Панов, Е. Н.** Анализ развития печей графитирования Кастнера в условиях потребностей современного рынка / **Е. Н. Панов, А. Ю. Педченко** // *Technology audit and production reserves*. – 2014. – Т. 4, № 1(18). – С. 57-60. – doi:10.15587/2312-8372.2014.26434.
 7. **Karvatskii, A.** Numerical analysis of the physical fields in the process of electrode blanks graphitization in the castner furnace / **A. Karvatskii, S. Leleka, A. Pedchenko, T. Lazarev** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6, № 5(84). – P. 19-25. – doi:10.15587/1729-4061.2016.83191.
 8. **Li, Y.** Numerical Simulation Analysis on Lengthwise Graphitization Furnace Co-production Silicon Carbide / **Y. Li, Y. Hu, L. Wu, Ch. Yu** // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vols. 557-559 – P. 835-838. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.557-559.835.
 9. **Chong, Sh.** Numerical study on the heat recovery and cooling effect by built-in pipes in a graphitization furnace / **Sh. Chong, Zh. Maoyong, L. Xianting** // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 90. – P. 1021-1031. – doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.036.
 10. **Gala, M.** Parametry pracy zespołu prostownikowego pieca grafityzacyjnego / **M. Gala, K. Jagiela, M. Kępiński** // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2015. – Vol. 10. – P. 71-75.
 11. **Piekło, J.** Analysis of the State of Stress in the Connection of Graphite Electrodes / **J. Piekło, M. Maj** // *Archives of Foundry Engineering*. – 2015. – Vol. 15, issue 1. – P. 85-88.
 12. **Kuznetsov, D. M.** Shrinkage phenomena in graphitization of preforms in Castner furnaces / **D. M. Kuznetsov** // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2000. – Vol. 41, Nos. 7-8. – P. 279-282. – doi:10.1007/BF02693765.
 13. **Frohs, W.** Expansion of carbon artifacts during graphitization / **W. Frohs, F. Roebner** // *TANSO*. – 2015. – Vol. 2015, No. 267 – P. 77-83. – doi:10.7209/tanso.2015.77.
 14. **Mazur, M.** Emisja zanieczyszczeń z procesu grafityzacji elektrod węglowych w piecach LWG (Castnera). Część 1. Wybrane substancje gazowe / **M. Mazur, R. Oleniacz, M. Bogacki, P. Szczygłowski** // *Inżynieria Środowiska*. – 2005. – Т. 10, Z. 2. – S. 149-160.
 15. **Mazur, M.** Emisja zanieczyszczeń z procesu grafityzacji elektrod węglowych w piecach LWG (Castnera). Część 2. Wybrane substancje pyłowe / **M. Mazur, R. Oleniacz, M. Bogacki, P. Szczygłowski** // *Inżynieria Środowiska*. – 2006. – Т. 11, Z. 1. – S. 27-38.
 16. **Bogacki, M.** Evaluation of gas emissions from graphitising of carbon products / **M. Bogacki, R. Oleniacz, M. Mazur** // *Environmental Engineering III* / Ed. A. Pawłowski. – London : Taylor & Francis Group, 2010. – Ch. 2 – P. 9-14. – doi:10.1201/b10566-5.
 17. **Vedin, V. A.** Improving thermal insulation for graphitization furnaces / **V. A. Vedin, V. I. Pirogov** // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2008. – Vol. 49, No. 6. – P. 416-417. – doi:10.1007/s11148-009-9115-x.
 18. **Карвацкий, А. Я.** Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / **А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, И. В. Пулинец, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 5, № 5(71). – С. 45-49. – doi:10.15587/1729-4061.2014.27989.
 19. **Matsumoto, R.** Thermoelectric Properties and Electrical Transport of Graphite Intercalation Compounds / **R. Matsumoto, Y. Hoshina, N. Akuzawa** // *Materials Transactions*. – 2009. – Vol. 50, No. 7 – P. 1607-1611. – doi:10.2320/matertrans.E-M2009813.
 20. **Matsumoto, R.** Thermoelectric Properties and Performance of *n*-Type and *p*-Type Graphite Intercalation Compounds / **R. Matsumoto, Y. Okabe, N. Akuzawa** // *Electronic Materials*. – 2015. – Vol. 44, No. 1. – P. 399-406. – doi:10.1007/s11664-014-3409-6.
 21. System for reduction in temperature variation during lengthwise graphitization of carbon bodies: patent WO/2001/078460 : IPC B32B 18/00, C04B 35/52, C04B 35/64, H05B 3/00, H05B 7/085 / **T. W. Weber, J. J. Pavlisin, J. W. Tzeng** [et al.]; applicant is Graph Tech Inc. – Appl. No. PCT/US2000/009528; filing date 10.04.2000; publ. date 18.10.2001. – 24 p.

Bibliography (transliterated)

1. **Makarov, A. N., Rybakova, V. V., Galicheva, M. K.** Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces. *Journal of Electromagnetic Analysis and Application*, 2014, **6**, 184-192. – doi:10.4236/jemaa.2014.67018.
2. **Adams, R., Frohs, W., Jäger, H., Roussel, K.** Graphite electrode and needle coke development: Carbon 2007 Conference, 15-20 July 2007, Seattle, Washington, The American Carbon Society.
3. **Lee, S.-M., Kang, D.-S., Roh, J.-S.** Bulk graphite: materials and manufacturing process. *Carbon Letters*, 2015, **16**(3), 135-146. – doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
4. **Inagaki, M., Kaburagi, Y., Hishiyama, Y.** Thermal Management Material: Graphite. *Advanced Engineering Materials*, 2014, **16**(5), 494-506. – doi:10.1002/adem.201300418.
5. **Kuznetsov, D. M., Korobov, V. K.** A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2001, **42**(9-10), 355-359. – doi:10.1023/A:101402273.
6. **Panov, Ye. N., Pedchenko, A. Yu.** Reasonable application analysis of Casnter graphitization furnaces according to the demands of modern market. *Technology audit and production reserves*, 2014, **4.1**(18), 57-60. – doi:10.15587/2312-8372.2014.26434.
7. **Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenko, A., Lazarev, T.** Numerical analysis of the physical fields in the process of electrode blanks graphitization in the Castner furnace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **6.5**(84), 19-25. – doi:10.15587/1729-4061.2016.83191.
8. **Li, Y., Hu, Y., Wu, L., Yu, Ch.** Numerical Simulation Analysis on Lengthwise Graphitization Furnace Co-production Silicon Carbide. *Advanced Materials Research*, 2012, **557-559**, 835-838. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.557-559.835.
9. **Chong, Sh., Maoyong, Zh., Xianting, L.** Numerical study on the heat recovery and cooling effect by built-in pipes in a graphitization furnace. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **90**, 1021-1031. – doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.036.
10. **Gala, M., Jagiela, K., Kępiński, M.** Parametry pracy zespołu prostownikowego pieca grafityzacyjnego. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, **10**, 71-75.

11. **Pieklo, J., Maj, M.** Analysis of the State of Stress in the Connection of Graphite Electrodes. *Archives of Foundry Engineering*, 2015, **15**(1), 85-88.
12. **Kuznetsov, D. M.** Shrinkage phenomena in graphitization of preforms in Castner furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2000, **41**(7-8), 279-282. – doi:10.1007/BF02693765.
13. **Frohs, W., Roeßner, F.** Expansion of carbon artifacts during graphitization. *TANSO*, 2015, **2015**(267), 77-83. – doi:10.7209/tanso.2015.77.
14. **Mazur, M., Oleniacz, R., Bogacki, M., Szczygłowski, P.** Emisja zanieczyszczeń z procesu grafityzacji elektrod węglowych w piecach LWG (Castnera). Część 1. Wybrane substancje gazowe. *Inżynieria Środowiska*, 2005, **10**(2), 149-160.
15. **Mazur, M., Oleniacz, R., Bogacki, M., Szczygłowski, P.** Emisja zanieczyszczeń z procesu grafityzacji elektrod węglowych w piecach LWG (Castnera). Część 2. Wybrane substancje pyłowe. *Inżynieria Środowiska*, 2006, **11**(1), 27-38.
16. **Mazur, M., Bogacki, M.** "Evaluation of gas emissions from graphitising of carbon products". *Environmental Engineering III*, edited by A. Pawlowski, Taylor & Francis Group, 2010, 9-14. – doi:10.1201/b10566-5.
17. **Vedin, V. A., Pirogov, V. I.** Improving thermal insulation for graphitization furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2008, **49**(6), 416-417. – doi:10.1007/s11148-009-9115-x.
18. **Karvatskii, A., Leleka, S., Pulync, I., Lazariyev, T., Pedchenko, A.** Electrical contact resistance research of graphite with copper and termo-expanded graphite. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, **5.5**(71), 45-49. – doi:10.15587/1729-4061.2014.27989.
19. **Matsumoto, R., Hoshina, Y., Akuzawa, N.** Thermoelectric Properties and Electrical Transport of Graphite Intercalation Compounds. *Materials Transactions*, 2009, **50**(7), 1607-1611. – doi:10.2320/matertrans.E-M2009813.
20. **Matsumoto, R., Okabe, Y., Akuzawa, N.** Thermoelectric Properties and Performance of *n*-Type and *p*-Type Graphite Intercalation Compounds. *Electronic Materials*, 2015, **44**(1), 399-406. – doi:10.1007/s11664-014-3409-6.
21. **Quandt, H. C., Weber, T. W.** System for reduction in temperature variation during lengthwise graphitization of carbon bodies. Patent No. WO/2001/078460. 18 October 2001.

Відомості про авторів (About authors)

Карвацький Антон Янович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, м. Київ, Україна; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Anton Karvatskii – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Professor of Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, Kiev, Ukraine; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Панов Євген Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», декан інженерно-хімічного факультету, м. Київ, Україна; e-mail: panov@rst.kpi.ua.

Yevgen Panov – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Dean of Faculty of Chemical Engineering, Kiev, Ukraine; e-mail: panov@rst.kpi.ua.

Педченко Анатолій Юрійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», молодший науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», м. Київ, Україна; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Anatoliy Pedchenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Junior researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies", Kiev, Ukraine; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Лелека Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», м. Київ, Україна; e-mail: sleleka@rst.kpi.ua.

Serhii Leleka – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies", Kiev, Ukraine; e-mail: sleleka@rst.kpi.ua.

Лазарєв Тарас Валерійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», м. Київ, Україна; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Taras Lazariyev – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies", Kiev, Ukraine; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Деркач Василь Васильович – ПрАТ «Укрграфіт», начальник управління з технології та розвитку, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua.

Vasyl Derkach – PrJSC "Ukrgrafit", Head of Technology and Development Department, Zaporizhia, UKRAINE; e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua.

Тютюнник Олексій Володимирович – ПрАТ «Укрграфіт», зам. директора з капітального будівництва, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua.

Oleksiy Tyutyunnyk – PrJSC "Ukrgrafit", Deputy Director of Capital Construction, UKRAINE; e-mail: technology@ukrgrafit.com.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Карвацький, А. Я. Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування електродів у печах Кастнера / **А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарєв,**

В. В. Деркач, О. В. Тютюнник // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017 – № 32 (1254). – С. 30-36. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.05.

Please cite this article as:

Karvatskii, A., Panov, Ye., Pedchenko, A., Leleka, S., Lazarev, T., Derkach, V., Tyutyunnyk, O. Investigation of the influence of constructive-technological parameters on the direct graphitization process of electrodes in Castner furnaces. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017 **32** (1254), 30–36, doi:10.20998/2413-4295.2017.32.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Карвацкий, А. Я. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров на процесс прямого графитирования электродов в печах Кастнера / **А. Я. Карвацкий, Э. Н. Панов, А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, В. В. Деркач, А. В. Тютюнник** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 30-36. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.05.

АННОТАЦИЯ Используя разработанную численную модель теплоэлектрического состояния печи графитирования Кастнера, выполнено численные исследования влияния внутреннего диаметра кольцевых электропрокладок и контактного сопротивления между электродными заготовками на физическое состояние печи прямого нагрева. Предложено для увеличения минимальной температуры заготовок в течение процесса графитирования углеродной продукции использовать на концах электродных свечей электроконтактные прокладки с увеличенным электрическим сопротивлением. Рациональным диаметром отверстия электроконтактных межэлектродных прокладок является отверстие, размеры которого составляют около 50-70% от наружного диаметра заготовок.

Ключевые слова: графитовые электроды; печь графитирования Кастнера; электроконтактная прокладка; контактное электрическое сопротивление.

Надійшла (received) 28.08.2017